

# OBESERVER GANGGUAN TAKLINIER PADA FREKUENSI TINGGI UNTUK SISTEM TAKLINEAR BERORDE TIGA

*by* Nur Alif Mardiyah

---

**Submission date:** 31-Jan-2020 11:26AM (UTC+0700)

**Submission ID:** 1249136804

**File name:** Bu\_Alif\_3.pdf (471.69K)

**Word count:** 4127

**Character count:** 24016

# OBESERVER GANGGUAN TAKLINIER PADA FREKUENSI TINGGI UNTUK SISTEM TAKLINEAR BERORDE TIGA

**Zulfatman Has, Nur Alif Mardiyah**

Jurusan Teknik Elektro - Fakultas Teknik  
Universitas Muhammadiyah Malang  
Jl. Raya Tlogomas No. 246, Malang 65144

Kontak Person:

Zulfatman Has

Jl. Raya Tlogomas No. 246, Malang 65144, Telp/Fax: +62341-464318 Ext. 129/+62341-460782

E-mail: [zulfatman@umm.ac.id](mailto:zulfatman@umm.ac.id)

## Abstrak

Pada sistem kontrol, faktor gangguan adalah faktor yang tidak dapat diabaikan begitu saja, karena berpotensi menurunkan performa sebuah sistem. Sehingga faktor gangguan menjadi salah satu unsur penting dalam model sebuah sistem. Konsekuensinya, sistem kontrol yang dirancang juga harus memiliki fitur yang mampu mendeteksi besarnya gangguan, yang dikenal sebagai observer gangguan. Untuk mengamati sistem yang mengandung ketidakpastian dan gangguan yang tinggi, observer gangguan taklinier adalah solusi yang tepat karena memiliki akurasi yang lebih baik. Tujuan dari studi ini adalah untuk merancang observer yang mampu mengamati ketidakpastian dan gangguan-gangguan luar yang tak diketahui dan berfrekuensi lebih tinggi untuk sistem berorde tiga. Model sistem orde tiga yang digunakan adalah model taklinier sistem penggerak hidrolik. Gangguan-gangguan luar diasumsikan berada pada state yang sama dengan sinyal kontrol, memiliki besaran yang tidak diketahui dan berfrekuensi relatif tinggi. Sistem pengaturan yang digunakan adalah Adaptive Siding Mode Control yang beradaptasi terhadap hasil estimasi observer gangguan. Observer gangguan dikembangkan dalam bentuk taklinier menggunakan metode reduced-order untuk sistem orde tiga. Pengujian observer yang dirancang dilakukan melalui simulasi pada Simulink Matlab. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa observer gangguan taklinier yang dirancang dapat mengamati gangguan yang berfrekuensi relatif tinggi dengan hampir tiga kali lebih akurat dari pada observer gangguan taklinier konvensional. Kemudian, observer juga memiliki kemampuan mengamati gangguan dan ketidakpastian secara bersamaan yang menyebabkan sistem kontrol mampu mengurangi error respon keluaran sistem sebesar hampir 20%. Pengembangan observer jenis ini berpotensi mendorong sistem kontrol untuk menghasilkan sinyal kontrol yang lebih baik dalam mengkompensasi gangguan dan ketidakpastian pada sistem tak linier.

**Kata kunci:** sistem taklinier, observer berbasis kontrol, observer gangguan, ketidakpastian, frekuensi tinggi

## 1. Pendahuluan

Pada sistem apapun khususnya sistem penggerak, faktor gangguan adalah faktor yang tidak dapat diabaikan begitu saja. Gangguan-gangguan ini berpotensi untuk mengganggu performa sebuah sistem. Dalam sistem penggerak hidrolik misalnya, gangguan-gangguan dapat berupa perubahan beban, gesekan, kebocoran internal, kebocoran eksternal, dan lain sebagainya. Gangguan-gangguan tersebut dapat mengurangi akselerasi dan akurasi penempatan posisi piston sistem hidrolik. Sehingga dalam pemodelan sebuah sistem, komponen gangguan ini menjadi unsur yang patut dimasukkan sebagai bagian dari model. Konsekuensinya pada algoritma sistem kontrol yang dirancang untuk sistem tersebut juga harus memiliki fitur yang mampu mendeteksi dan mengkompensasi besaran unsur gangguan yang ada tersebut. Fitur ini dikenalkan oleh [1] sebagai observer gangguan, yang dikembangkan dari konsep Luenberger [2]. Luenberger pada awalnya hanya mengembangkan observer untuk mendeteksi *state* pada sebuah sistem. Dengan adanya observer gangguan, maka gangguan-gangguan yang ada pada sistem dapat diobservasi. Jika observer diintegrasikan dengan sebuah sistem kontrol secara adaptif maka observer tersebut akan mampu meningkatkan performa sistem kontrol tersebut dalam mengkompensasi gangguan-gangguan dengan lebih baik. Akan tetapi, observer gangguan yang dikembangkan pada dua dekade awal ini adalah observer untuk gangguan pada sistem linier dan lebih banyak digunakan untuk sistem berorde dua.

Observer gangguan linier mungkin sesuai dan akurat jika digunakan untuk sistem yang dimodelkan secara linier. Tetapi, jika digunakan dan dikembangkan untuk sistem-sistem yang memiliki dinamika yang tak dapat dimodelkan, mengandung ketaklinieran dan ketidakpastian yang tinggi, serta gangguan-gangguan luar yang besar, maka observer jenis ini kurang sesuai. Observer menjadi kurang sensitif terhadap dinamika sistem, sehingga memiliki akurasi yang rendah. Observer gangguan taklinier adalah jenis observer yang banyak digunakan semenjak dikembangkan oleh Chen

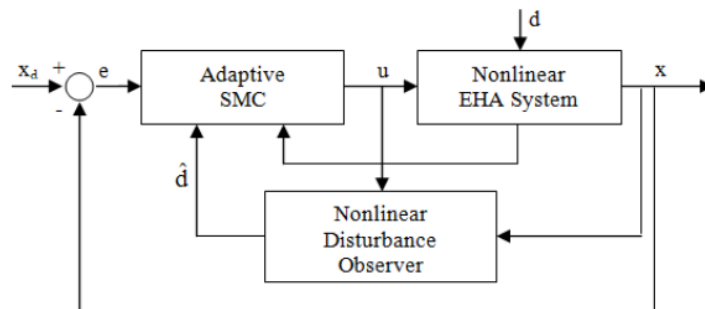
[3]. Observer jenis ini ternyata lebih mampu beradaptasi dan lebih sensitif terhadap perubahan dinamika sistem. Chen mengembangkan observer gangguan taklinier untuk diaplikasikan pada sistem orde dua. Gagasan ini kemudian dikembangkan dengan beragam sisi pandang dan algoritma [4-9].

Mengembangkan observer gangguan taklinier untuk sistem taklinier berorde tiga memiliki tantangan tersendiri jika dibandingkan dengan sistem-sistem berorde dua. Dinamika sistem lebih sulit untuk diukur, misalnya karena keterbatasan sensor maupun faktor *noise* yang lebih tinggi. Observer gangguan taklinier untuk sistem taklinier berorde tiga untuk gangguan luar berfrekuensi rendah berusaha dikembangkan terintegrasi dengan sistem kontrol adaptif robust [10]. Tetapi, observer tersebut tidak dirancang untuk mengamati unsur ketaktentuan sistem sekaligus. Sehingga, pengembangan observer yang mampu bekerja untuk mengamati gangguan yang berfrekuensi lebih tinggi dan ketaktentuan sekaligus adalah sangat diperlukan.

Sehingga, ide utama pada artikel ini adalah bagaimana merancang sebuah observer taklinier yang digunakan untuk mengestimasi gangguan-gangguan luar yang berfrekuensi lebih tinggi pada sistem taklinier berorde tiga. Observer juga dikembangkan untuk mampu mengamati keberadaan ketaktentuan, agar sistem kontrol dapat mengkompensasi gangguan dan ketaktentuan sekaligus. Selanjutnya artikel ini akan dikembangkan dengan organisasi sebagai mana berikut ini. Bagian berikutnya menjelaskan model tak linier dari sistem orde tiga dan skema sistem kontrol yang digunakan. Kemudian pada bagian ketiga, algoritma observer gangguan yang dirancang dijelaskan secara detail beserta tahapan setup dari proses simulasi. Sementara itu, pada bagian keempat, hasil dari proses simulasi akan dikemukakan sesuai tahapan simulasi, yang masing-masing diikuti dengan pembahasan. Sebagai penutup, bagian akhir artikel berisikan kesimpulan dari studi yang dilakukan.

## 2. Metodologi

Studi ini dikembangkan dan divalidasi melalui simulasi pada software Matlab Simulink dengan menggunakan skema observer gangguan berbasis sistem kontrol yang sudah dikembangkan oleh peneliti sebelumnya [14] dan [10-11], sebagaimana terdapat pada Gambar 1 berikut ini:



**Gambar 1** Struktur observer gangguan taklinier berbasis sistem kontrol

Penggunaan skema ini dilakukan karena observer gangguan taklinier yang dikembangkan terintegrasi pada sebuah sistem kontrol adaptif berbasis *sliding mode* yang sudah dikembangkan sebelumnya pada [10]. Model sistem orde 3 yang digunakan berdasarkan pada model taklinier sistem penggerak elektro-hidrolik (EHA) yang di kembangkan pada [11].

### 2.1 Model Taklinier Sistem Orde Tiga

Jika variable state sistem didefinisikan  $x = [x_1, x_2, x_3]^T \equiv [x_p, v_p, a_p]^T$ , persamaan state sistem merupakan orde tiga yang terdiri dari posisi, kecepatan, dan percepatan:

$$\dot{x}_1 = x_2(t) \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = x_3(t) \quad (2)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{m} [(A_1 \dot{p}_1 - A_2 \dot{p}_2) - \dot{F}_f - \dot{f}_d] \quad (3)$$

Persamaan ini kemudian dikembangkan menggunakan sejumlah parameter sebagaimana yang terdapat pada [11], hingga diperoleh persamaan taklinier sistem sebagai berikut:

$$\dot{x}_3 = -\frac{\beta_e}{m} \left( \frac{A_1^2}{V_1} + \frac{A_2^2}{V_2} \right) x_2 + \frac{\beta_e C_a k_a}{m} \left( \frac{A_1}{V_1} \sqrt{\Delta p_1} + \frac{A_2}{V_2} \sqrt{\Delta p_2} \right) u - \frac{\beta_e}{m} \left( \frac{A_1}{V_1} Q_{1LL} + \frac{A_2}{V_2} Q_{2LL} \right) - \left( \frac{\dot{F}_f + \dot{f}_d}{m} \right) \quad (4)$$

Kemudian, persamaan dinamika sistem pada (4) digambarkan dalam persamaan sistem taklinier single input single output:

$$\dot{x}_3 = f(x, t) + g(x)u(t) + d_i(t) \quad (5)$$

Persamaan (1) sampai (5) menjelaskan model sistem EHA yang digunakan. Penyertaan gesekan, kebocoran internal, ketasimetrisan aktuatur, zona mati, volume awal pada kedua sisi silinder, volume antara pompa dan valve, dan volume pada pipa menghasilkan model yang lengkap untuk sistem. Turunan dari gesekan, kebocoran internal, dan kesalahan pemodelan dihitung dan akumulasi sebagai gangguan internal,  $d_i$ .

Berdasarkan persamaan taklinier dari model sistem EHA yang sudah dideskripsikan pada persamaan (5), maka persamaan tersebut dapat dimodifikasi menjadi

$$\dot{x}_3 = \hat{f}(x) + \Delta f(x, t) + \hat{g}(x)u(t) + \Delta g(x, t)u(t) + d_i(t) \quad (6)$$

Di mana  $\hat{f}(x) \in R^n$  and  $\hat{g}(x) \in R^n$  masing-masing merupakan bagian nominal dinamika taklinier sistem dan gain kontrol,  $\Delta f(x, t) \in R^n$  and  $\Delta g(x, t) \in R^n$  merupakan bagian-bagian yang tak tentu,  $u(t) \in R$  adalah masukan kontrol dari pada sistem, dan komponen  $d_i(t) \in R$  merupakan kumpulan gangguan dalam yang berisikan gangguan, kebocoran dalam, ketaklinieran yang tak tentu, dan dinamika-dinamika yang tidak dapat dimodelkan.

Merujuk pada persamaan (6),  $\Delta f(x, t)$  diasumsikan sebagai berikut

$$|\Delta f(x, t)| \leq E_f(x, t) \quad (7)$$

Kemudian, besaran ketaktentuan dibatasi untuk menjamin gain kontrol tidak menyebabkan kegagalan proses pengendalian. Ini tergambar melalui persamaan ketaksamaan berikut:

$$0 < g_{\min} \leq g \leq g_{\max} \quad (8)$$

$g_{\min}$  and  $g_{\max}$  diketahui sebagai batas atas dan batas bawah dari  $g$ . Dalam dinamika seperti ini, masukan kontrol dikalikan dengan gain kontrol, dan rata-rata geometri dari batas atas dan batas bawah dari gain digunakan sebagai estimasi dari nilai  $g$ , oleh karena itu

$$\hat{g} = (g_{\min} \cdot g_{\max})^{1/2} \quad (9)$$

Meneruskan persamaan (6), dengan mengasumsikan  $d_i$  sebagai bagian dari persamaan tersebut bersama  $d_e(t) \in R$ , kumpulan gangguan internal and gangguan eksternal didefinisikan sebagai berikut

$$D_i \geq d_i(t) \quad D_e \geq d_e(t) \quad (10)$$

Di mana  $D_i$  and  $D_e$  dapat didefinisikan sebagai konstanta atau berubah terhadap waktu. Dengan demikian, dengan mempertimbangkan (7) s.d (10), persamaan taklinier sistem (6) dapat direformulasi menjadi:

$$\dot{x}_3 = \hat{f} + E_f + gu + D_i + D_e \quad (11)$$

## 2.2 Sistem Kontrol

Sistem kontrol yang digunakan dalam pengembangan observer gangguan ini adalah *Adaptive Sliding Mode Control (ASMC)*. Tahapan dalam penyusunan sistem kontrol ini terdiri dari penentuan *sliding surface* dan parameternya, penyusunan algoritma kontrol dan persamaan stabilitasnya. Tahapan tersebut diuraikan secara detail sebagai berikut ini:

### Sliding Surface

Tujuan dari sistem kontrol ini adalah untuk menghasilkan masukan kontrol  $u$  bagi sistem. Sehingga, respon keluaran sistem  $x_p$  menjejak seakurat mungkin lintasan posisi yang diharapkan  $x_d$  sekalipun dengan beragam kondisi pengoperasian. Untuk mendorong state-state sistem untuk mengikuti lintasan (*trajectory*) yang diinginkan, fungsi *sliding surface* diformulasi seperti berikut ini:

$$S(e, t) = \lambda^2 e_1 + 2\lambda e_2 + e_3 \quad (12)$$

Kesalahan dalam proses penjejakan  $e_i$  didefinisikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} e_1 &= x_1 - x_{1d} \\ e_2 &= x_2 - x_{2d} \\ e_3 &= x_3 - x_{3d} \end{aligned} \quad (13)$$

$\lambda$  adalah bilangan konstan positif yang dispesifikasikan bergantung pada dinamika yang diinginkan pada sistem loop tertutup, sementara  $e_1$  and  $e_2$  bergantung pada besaran nilai  $\lambda$ . Respon dinamika yang diharapkan adalah agar  $S=0$ . Jika  $S$  didorong menjadi nol, dinamika yang diharapkan akan mengikuti *trajectory* dan kesalahan *tracking* (penjejakan) akan menuju nol.

### Control Law

Untuk mendapatkan aturan kontrol, dipergunakan formula nilai konstan plus metode *proportional reaching law* seperti yang digunakan pada [12-13]. Dinamika fungsi *switching* secara langsung dispesifikasikan menggunakan pendekatan ini, yang dideskripsikan dalam format fungsi *reaching* berikut

$$\dot{S} = -K \operatorname{sgn}(S) - HS \quad (14)$$

Di mana  $K$  and  $H$  merupakan matriks diagonal dengan nilai positif. Elemen  $K$  yang kecil dapat mereduksi *chattering*, dan nilai  $H$  yang besar dipilih untuk meningkatkan waktu *reaching*. Sehingga turunan dari persamaan (12) diberikan

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \lambda^2 \dot{e}_1 + 2\lambda \dot{e}_2 + \dot{e}_3 \\ \dot{S} &= \lambda^2 \dot{e}_1 + 2\lambda \dot{e}_2 + \dot{x}_3 - \dot{x}_{3d} \end{aligned} \quad (15)$$

Substitusi  $\dot{x}_3$  dengan (11), maka

$$\dot{S} = w + \hat{f} + E_f + gu + D_i + D_e \quad (16)$$

Di mana  $w = \lambda^2 \dot{e}_1 + 2\lambda \dot{e}_2 - \dot{x}_{3d}$ .

Aturan kontrol didapatkan dengan mensubstitusi persamaan metode *reaching law* pada (4.22) ke dalam fungsi *reaching* (16), di mana fungsi-fungsi untuk ketaktentuan dan gangguan dikeluarkan dari persamaan, karena fungsi-fungsi tersebut akan menjadi bagian dari gain *switching* dan objek aksi diskontinyu dari pada sistem kontrol. Kemudian

$$-K \operatorname{sgn}(S) - HS = w + \hat{f} + \hat{g}u \quad (17)$$

$$u = \hat{g}^{-1}(-w - \hat{f} - K \operatorname{sgn}(S) - HS) \quad (18)$$

Kemudian, aturan kontrol pada (18) dapat disederhanakan menjadi

$$u = u_n + u_{eq} \quad (19)$$



Di mana masing-masing

$$u_n = \hat{g}^{-1}(-w - \hat{f}) \quad (20)$$

$$u_{eq} = \hat{g}^{-1}(-K \operatorname{sgn}(S) - HS) \quad (21)$$

Di mana  $u_n$  merupakan kontrol nominal bagi bagian nominal pada sistem (6), dan  $u_{eq}$  merupakan kontrol ekuivalen dengan fungsi *switching* untuk menjamin sistem tetap *robust*.

Karena sistem kontrol dirancang untuk meningkatkan performa penjejak yang lebih baik, maka *chattering* diminimalkan menggunakan aturan kontrol berikut

$$u = u_n + \hat{g}^{-1}(-K \operatorname{sat}(S/\phi) - HS) \quad (22)$$

### Stabilitas Sistem Kontrol

Untuk menggaransi stabilitas aksi kontrol yang dilakukan, kondisi *reaching* berikut musti dimiliki

$$\dot{V} = S(e,t)\dot{S}(e,t) < 0 \quad (23)$$

Kondisi *reaching* hanya digaransi ketika

$$K > E_f + |D_i|_{\max} + |D_e|_{\max} \quad (24)$$

Gain *switching* dari SMC harus lebih besar dari batas kesalahan estimasi dari  $f(x)$  dan batas atas magnitud dari kedua gangguan.

Dengan memilih kandidat fungsi Lyapunov  $V = \frac{1}{2}S(e,t)^2$ , kondisi *reaching* dapat direformulasi menjadi

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} S(e,t)^2 = S(e,t)\dot{S}(e,t) \leq -\eta|S(e,t)| \quad (25)$$

Di mana  $\eta \in R$  harus bernilai positif. Menggunakan (12), (16) dan (18) dengan mengeluarkan fungsi waktu *reaching*, persamaan (25) dapat ditulis ulang menjadi

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S\dot{S} \leq -\eta|S| \\ S(w + \hat{f} + E_f + gu + D_i + D_e) &\leq -\eta|S| \\ S((\beta - 1)|w + \hat{f}| + \beta(E_f + D_i + D_e)) + \beta\eta|S| &\leq K|S| \end{aligned} \quad (26)$$

### Adaptive Switching Gain

Aturan kontrol SMC di atas dikembangkan agar memiliki gain *switching*  $K$  yang beradaptasi dengan ketaktentuan dan gangguan. Gain *switching* adaptif  $K$  dapat dihitung dari persamaan (26) dan dideskripsikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} K|S| &\geq S((\beta - 1)|w + \hat{f}| + \beta(E_f + D_i + D_e)) + \beta\eta|S| \\ K &\geq \beta(E_f + \eta + D_i + D_e) + (\beta - 1)|w + \hat{f}| \end{aligned} \quad (27)$$

Di mana  $\hat{g}g^{-1} \leq \beta$  dan  $\hat{g}$  bukan nol. Margin gain  $\beta$  diformulasi dengan

$$\beta = \sqrt{g_{\max} / g_{\min}} \geq 1 \quad (28)$$

Gain *switching*  $K$  menjamin sistem loop tertutup menjadi robust stabil secara asimtotik terhadap ketaktentuan terbatas, gain kontrol, dan kedua gangguan internal dan eksternal.

### 2.3 Observer Gangguan Taklinier

Perubahan gangguan luar akan dapat menyebabkan terhadap pada struktur ketaklinieran taktentu dan dinamika yang tak dimodelkan pada sistem EHA. Sehingga, gangguan luar pada (11) dapat dijadikan berubah terhadap waktu dari pada bernilai konstan, dan gangguan luar didefinisikan sebagai

$$D = D_e \quad (29)$$

Kemudian pada rancangan kontrol adaptif *sliding mode* di atas dengan penyertaan gangguan eksternal, persamaan (11) dapat ditulis menjadi

$$\dot{\hat{x}}_3 = \hat{f} + E_f + gu + D_i + D \quad (30)$$

Berdasarkan asumsi bahwa gangguan eksternal  $D$  adalah bervariasi secara perlahan berdasarkan fungsi waktu, maka hal ini akan mendorong

$$\dot{D} = 0 \quad (31)$$

Kemudian, persamaan (30) dapat ditulis dalam bentuk

$$D = \dot{\hat{x}}_3 - \hat{f} - E_f - gu - D_i \quad (32)$$

Untuk mengaproksimasi batasan gangguan yang tidak diketahui, sebuah observer gangguan awal diformulasikan sebagai

$$\begin{aligned} \dot{\hat{D}} &= -L\hat{D} + LD \\ &= -L\hat{D} + L(\dot{\hat{x}}_3 - \hat{f} - E_f - gu - D_i) \end{aligned} \quad (33)$$

Di mana  $L > 0$  merupakan fungsi *gain* dari *observer*. Sekarang, kesalahan yang diestimasi diberikan berupa

$$e_D = D - \hat{D} \quad (34)$$

Kemudian, differensial (34) didapat dengan mensubstitusikan (31) and (33), sehingga

$$\begin{aligned} \dot{e}_D &= \dot{D} - \dot{\hat{D}} \\ \dot{e}_D &= -\dot{\hat{D}} = L(\hat{D} - D) = -Le_D \end{aligned} \quad (35)$$

Gain *observer*  $L$  pada (33) dapat dirancang sebagai berikut

$$\dot{e}_D + Le_D = 0 \quad (36)$$

Kondisi di atas secara eksponensial stabil untuk seluruh  $x \in R^n$ . Sehingga, gangguan eksternal  $D$  dapat didekati dengan estimasi gangguan  $\hat{D}$  yang secara eksponensial dalam waktu yang tak terbatas.

Tetapi, ketidaktersediaan instrument pengukuran untuk  $\dot{\hat{x}}_3$  menyebabkan observer gangguan pada (33) tidak dapat diimplementasikan. Pada banyak sistem, pengukuran tidak mungkin dilakukan karena alasan adanya noise pada saat pengukuran. Agar dapat diimplementasikan, persamaan observer gangguan awal di atas dapat dimodifikasi sebagai observer gangguan tak linier (NDO). Dengan menggunakan metode observer *reduced-order*, sebuah variabel tambahan  $z$  diperkenalkan untuk mengatasi situasi ini, di mana

$$z = \hat{D} - L\dot{\hat{x}}_2 \quad (37)$$

Substitusikan (33) pada turunan dari (37) dihasilkan

$$\dot{z} = \dot{\hat{D}} - L\dot{\hat{x}}_3 = -L\hat{D} + LD - L\dot{\hat{x}}_3$$

$$= -L\hat{D} + L(\dot{x}_3 - \hat{f} - E_f - gu - D_i) - L\dot{x}_3 \quad (38)$$

Melanjutkan (38), di mana

$$\hat{D} = z - L\dot{x}_2 \quad (39)$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= -L(z + L\dot{x}_2) - L(\hat{f} + E_f + gu + D_i) \\ &= -Lz - L(\hat{f} + E_f + gu + D_i + L\dot{x}_2) \end{aligned} \quad (40)$$

Kemudian, NDO diformulasikan menjadi

$$\begin{cases} \hat{D} = z - L\dot{x}_2 \\ \dot{z} = -Lz - L(\hat{f} + E_f + gu + D_i + L\dot{x}_2) \end{cases} \quad (41)$$

Kesalahan yang diestimasi dari NDO didefinisikan sebagai

$$e_D = D - \hat{D} \quad (42)$$

Dari persamaan (35), (37), (38) dan (39), dapat dihasilkan bahwa

$$\begin{aligned} \dot{e}_D &= \dot{D} - \dot{\hat{D}} \\ &= \dot{D} - (\dot{z} + L\dot{x}_3) \\ &= -L((\dot{x}_3 - \hat{f} - E_f - gu - D_i) - (z + L\dot{x}_2)) + \dot{D} \\ &= -L(D - \hat{D}) + \dot{D} \\ &= -Le_D + \dot{D} \end{aligned} \quad (43)$$

Untuk  $\dot{D} = 0$ , error yang terestimasi (39) diberikan sebagai

$$\dot{e}_D + Le_D = 0 \quad (44)$$

Secara global, kesalahan  $e_D$  secara eksponensial didorong menuju nol untuk seluruh  $x \in R^n$ , ketika  $L > 0$  ditentukan. Sehingga,  $\hat{D}$  dapat diikuti oleh estimasi gangguan  $\hat{D}$ .

## 2.4 Setup dan Parameter

Lintasan (*trajectory*) state sistem dan gangguannya merupakan hal yang penting untuk rancang. *Trajectory* ini dirancang dengan amplitudo dan frekuensi yang lebih variatif berbentuk *chaotic*. Sementara itu gangguan luar yang diberikan kepada sistem dirancang untuk memiliki frekuensi lebih tinggi, yang perubahannya mengikuti perubahan *trajectory*. Sementara itu parameter sistem dan parameter kontrol yang digunakan dalam simulasi merujuk kepada [10]. Simulasi dilakukan pada Matlab dengan menggabungkan model, sistem kontrol dan observer gangguan seperti skema pada Gambar 1 di atas.

Untuk mengukur indeks performa error estimasi dan error respon keluaran sistem digunakan formula berikut is as given below

$$SSTE = \sum_{t=0}^N (x_{1d}(t) - x_1(t))^2 / N \quad (45)$$

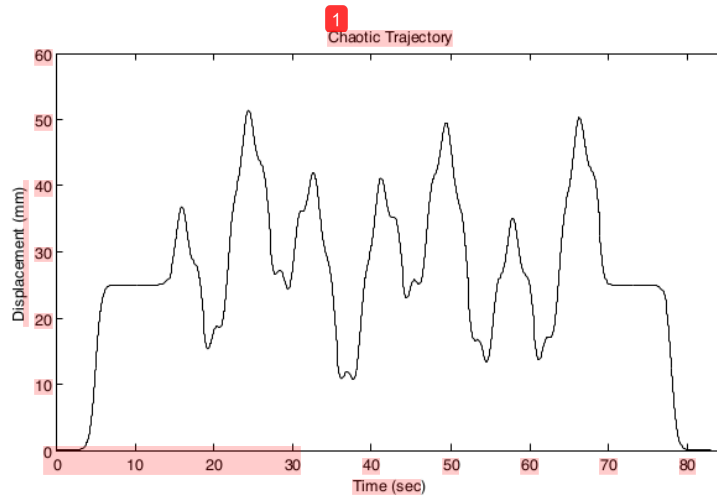
Di mana,  $x_{1d}$  merupakan *trajectory* atau gangguan,  $x_1$  adalah respon keluaran atau hasil estimasi gangguan, dan  $N$  menyatakan jumlah data yang diambil. Sementara itu performa sistem kontrol dihitung menggunakan



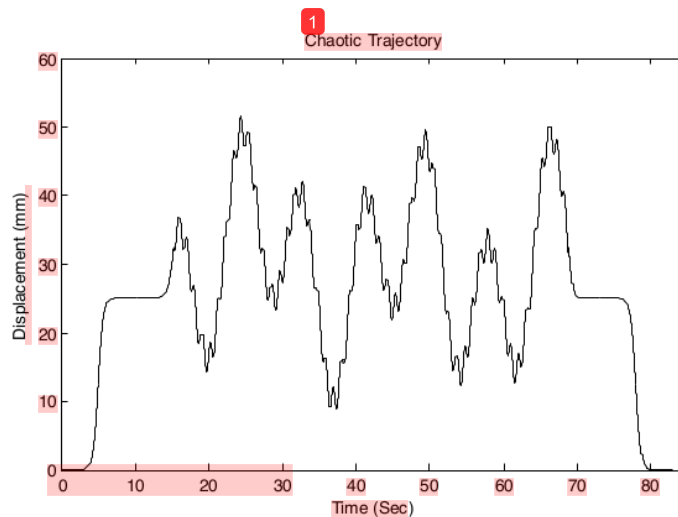
$$SSCI = \sum_{t=0}^N (u(t))^2 / N \quad (46)$$

Di mana,  $u(t)$  adalah sinyal kontrol signal dan  $N$  merupakan jumlah data sampel.

Berikut ini adalah dua *trajectory* berbeda frekuensi yang akan digunakan dalam proses simulasi. *Trajectory* kedua memiliki variasi frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan yang pertama. Dengan frekuensi gangguan yang lebih tinggi ini akan terlihat apakah observer yang dirancang mampu mengobservasi keberadaan gangguan. Waktu yang diperlukan untuk pengujian gangguan adalah selama 85 detik.



Gambar 2 *Trajectory chaotic* frekuensi rendah

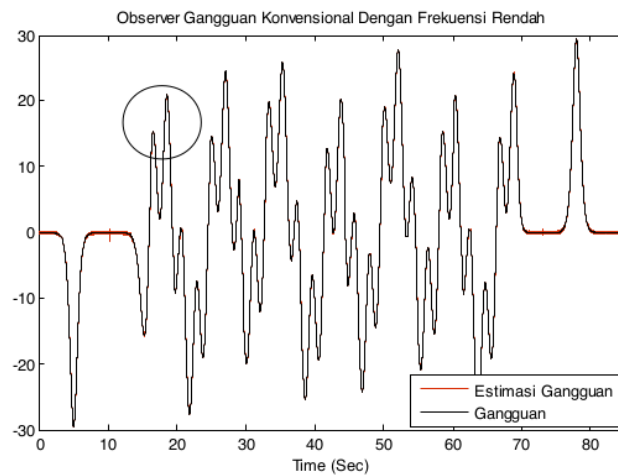


Gambar 3 *Trajectory chaotic* frekuensi tinggi

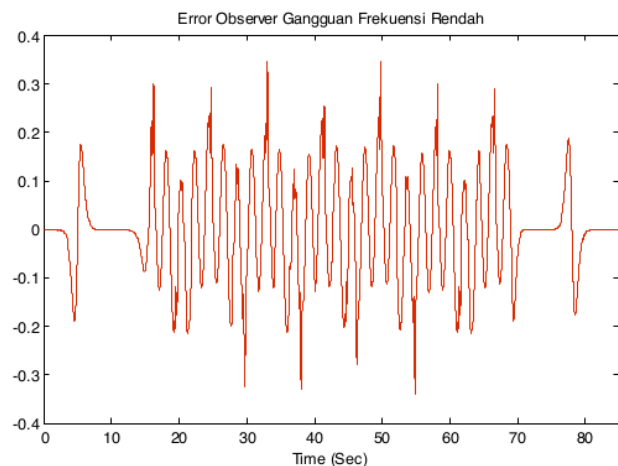
### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Observer Gangguan Taklinier Optimasi

Hal utama yang diuji pada tahapan ini adalah akurasi observer ketika diberikan gangguan dengan frekuensi yang lebih tinggi. Aspek yang menjadi perhatian adalah error estimasi observer.



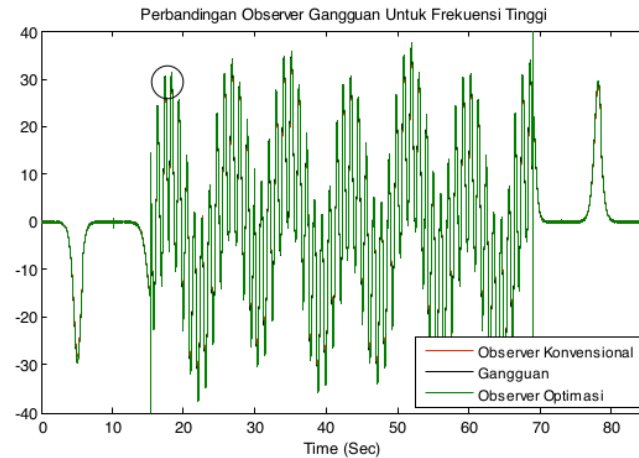
(a)



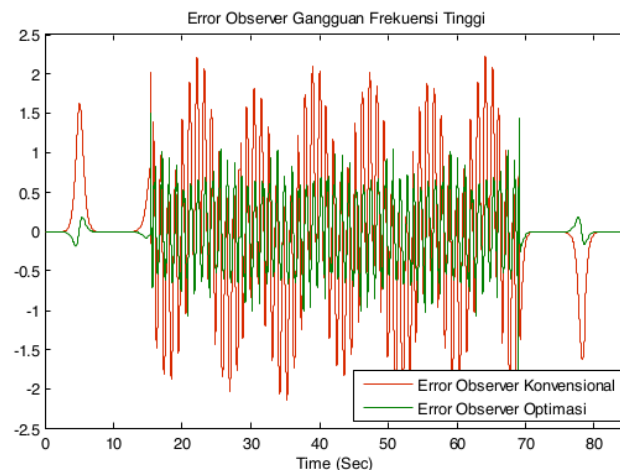
(b)

**Gambar 4** Observer konvensional untuk gangguan berfrekuensi rendah

Pada Gambar 4 di atas, observer bekerja dalam frekuensi rendah dan menggunakan observer konvensional. Dalam kondisi ini observer dapat bekerja dengan baik dengan akurasi yang tinggi. Namun seperti pada Gambar 5, ketika diberi frekuensi yang lebih tinggi, akurasi observer gangguan konvensional menurun. Error estimasinya, yang diukur menggunakan Indeks *Sum of Squared Tracking Error* (SSTE) pada (45), meningkat signifikan dari 0.1117 menjadi 4.2023. Namun, ketika observer gangguan yang sudah dioptimasi diterapkan, maka SSTE error estimasinya dapat diturunkan menjadi 1.4505. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma optimasi untuk observer gangguan taklinier yang dirancang mampu meningkatkan akurasi observer dalam mengestimasi gangguan sekalipun dalam frekuensi yang relatif tinggi. Hal ini dengan sendirinya akan meningkatkan performa sistem kontrol untuk lebih mampu menghasilkan error respon keluaran yang lebih kecil.



(a)



(b)

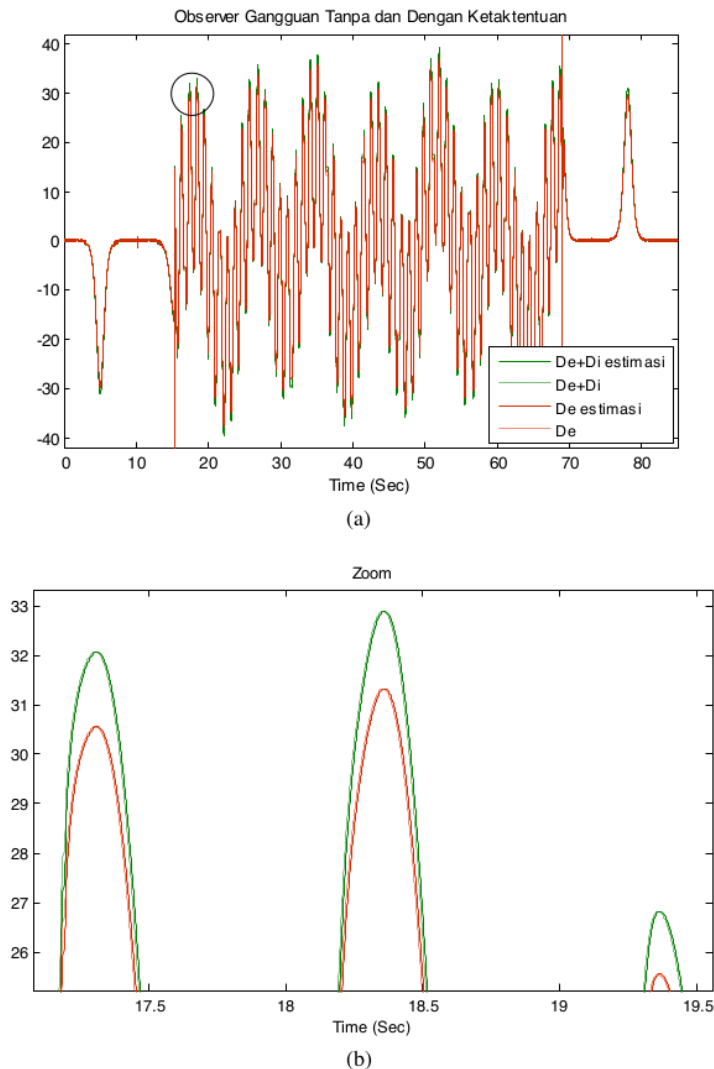
**Gambar 5** Perbandingan akurasi observer untuk gangguan frekuensi tinggi

Dari didiskusikan di atas, terdapat korelasi linier antara tingkat akurasi observer gangguan, besaran sinyal kontrol yang dihasilkan oleh sistem kontrol berbasis observer gangguan, dan penurunan error respon keluaran sistem orde tiga yang digunakan. Dari sini terlihat bahwa betapa pentingnya usaha merancang sebuah observer gangguan yang memiliki range frekuensi observasi yang lebih luas.

### 3.2 Observer Gangguan dan Ketaktentuan

Pada tahapan ini diuji kemampuan observer dalam mengobservasi gangguan dan ketaktentuan sekaligus dalam frekuensi gangguan yang lebih tinggi. Kemudian juga implikasi penyertaan ketaktentuan dalam estimasi observer gangguan terhadap sinyal kontrol dari sistem kontrol berbasis observer yang digunakan dan error respon keluaran sistem.

Gambar 6 berikut ini menunjukkan bahwa penyertaan ketaktentuan ( $D_t$ ) dalam proses observasi gangguan oleh observer gangguan dapat menyebabkan besaran gangguan total ( $D_e$  dan  $D_t$ ) yang diobservasi menjadi meningkat. Namun demikian, hal ini tidak mempengaruhi akurasi observer dalam mengestimasi gangguan, dengan SSE dari error estimasi yang relatif tidak berbeda untuk observer gangguan tanpa dan dengan penyertaan ketaktentuan masing-masing 1.4505 dan 1.4617.



**Gambar 6** Keluaran observer dengan penyertaan ketaktentuan dalam estimasi gangguan

Penyertaan ketaktentuan dalam mengobservasi besarnya gangguan sekaligus ( $D_e$  dan  $D_i$ ) tentunya berimplikasi pada makin sempurnanya fungsi sinyal kontrol yang dihasilkan untuk mengkompensasi gangguan dan ketaktentuan. Dari perhitungan menggunakan (46), diperoleh indeks *Sum of Squared Control Inputs* (SSCI) sinyal kontrol meningkat dari 0.615 menjadi 0.618. Peningkatan ini bergantung pada besarnya ketaktentuan yang terdapat pada sistem. Hal ini tentunya juga akan berpengaruh pada makin kecilnya error respon keluaran system, dengan indeks SSTE dari 0.370 menjadi 0.320.

#### 4. Kesimpulan

Dari pembahasan terhadap terhadap hasil simulasi, maka didapatkan kesimpulan bahwa observer gangguan taklinier untuk gangguan berfrekuensi lebih tinggi berhasil dirancang untuk sistem taklinier berorde tiga yang terintegrasi dengan sistem kontrol adaptif robust berbasis sliding mode. Observer gangguan taklinier yang dirancang memiliki tingkat akurasi observasi (estimasi) gangguan yang lebih baik hampir tiga kali lipat dari pada observer gangguan konvensional dalam frekuensi lebih

tinggi. Peningkatan akurasi observer gangguan akan meningkatkan performa sistem kontrol dalam mengkompensasi gangguan agar dapat mereduksi error respon keluaran sistem lebih maksimal. Penyertaan ketaktentuan dalam proses estimasi gangguan oleh observer pada frekuensi gangguan lebih tinggi, menyebabkan kontrol sistem mampu menghasilkan sinyal kontrol yang lebih baik tanpa mengurangi tingkat keakuratan observer, untuk menghasilkan error respon keluaran sistem yang tereduksi hampir 20%.

### Acknowledgement

Penelitian ini didukung oleh Hibah Penelitian Dasar Keilmuan (PDK) yang dibiayai dari Anggaran Dana Pembinaan Pendidikan (DPP) Universitas Muhammadiyah Malang (UMM) yang dikelola oleh Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (DPPM) UMM. Penulis dengan ini mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tinggi kepada DPPM UMM dan Program Studi Teknik Elektro UMM atas bantuan dan dorongannya dalam studi ini.

### Referensi

- [1] Ellis, G. *Observers in Control Systems: A Practical Guide*. Acad. Press. 2002.
- [2] Luenberger, D.G. Observing the State of A Linear System. *IEEE Trans. Mil. Electronics*. 1971; MIL-8 (1971): 74–80.
- [3] Chen, W-H., Ballance, D.J., Gawthrop, P.J., O'Reilly, J. A Nonlinear Disturbance Observer for Robotic Manipulators. *IEEE Trans. Industrial Electronics*. 2000; 47(4): 932–938.
- [4] Nikoobin, A. and Haghighi, R. Lyapunov-Based Nonlinear Disturbance Observer for Serial  $n$ -Link Robot Manipulators. *J. Intell Robot Syst*. 2009; 55: 135-153.
- [5] Chen, M. and Chen, W-H. Sliding Mode Control for A Class of Uncertain Nonlinear System Based on Disturbance Observer. *Int. J. Adapt. Control Signal Process*. 2010; 24(1): 51–64.
- [6] Mohammadi, A., Tavakoli, M., Marquez, H.J. and Hashemzadeh, F. Nonlinear Disturbance Observer Design For Robotic Manipulators. *Control Eng. Practice*. 2013; 21(3): 253–267.
- [7] Ginoya, D., Shendge, P. D., Phadke, S. B. Sliding Mode Control for Mismatched Uncertain Systems Using an Extended Disturbance Observer, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. 2014; 61(4): 1983-1992.
- [8] Guo, K., Wei, J., Fang, J., Feng, R. and Wang, X. Position Tracking Control of Electro-Hydraulic Single-Rod Actuator Based on Extended Disturbance Observer. *Mechatronics*. 2015; 27: 47-56.
- [9] Mohammed, S., Weiguang, H., Jian, H., Hala, R. and Yacine, A. Nonlinear Disturbance Observer Based Sliding Mode Control of A Human-Driven Knee Joint Orthosis. *Robotics and Autonomous Systems*. 2016; 75: 41-49.
- [10] Zulfatman, Rahmat, M. F., Husain, A. R., Ahmad, M. N. Robust Precision Control for A Class of Electro-hydraulic Actuator System Based on Disturbance Observer. *Int. Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2015; 16(8): 1753-1760.
- [11] Zulfatman, Rahmat, M. F., Husain, A. R., Ishaque, K., Ghazali, R., Ahmad, M. N., Sam, Y.M., Razali, S. M. Robust Position Tracking Control of an Electro-hydraulic Actuator System in the Presence of Friction and Internal Leakage. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2014; 39: 2965-2978.
- [12] Gao W. and Hung J. C. A Variable Structure Control of Nonlinear Systems: A New Approach. *IEEE Trans. on Ind. Electronics*. 1993; 40(1): 45-55.
- [13] Hassan, I.M.M., Mohamed, A.M. and Saleh, A.I. Variable Structure Control of a Magnetic Suspension System. *Proc. of the 2001 IEEE Conf. on Control Appl.*, Mexico City, Mexico, Sept. 5-7, 2001: 333-338.
- [14] Chen, W-H. Disturbance Observer Based Control for Nonlinear Systems. *IEEE Trans. on Mechatronics*. 2004; 9(4): 706–710.

# OBESERVER GANGGUAN TAKLINIER PADA FREKUENSI TINGGI UNTUK SISTEM TAKLINEAR BERORDE TIGA

## ORIGINALITY REPORT

12%	6%	3%	14%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

## PRIMARY SOURCES

1	Submitted to Universiti Teknologi Malaysia Student Paper	9%
2	www.coursehero.com Internet Source	4%

Exclude quotes	On	Exclude matches	< 2%
Exclude bibliography	On		